

反射法探査による岩盤フラクチャーゾーンの評価手法

桑原 徹 鈴木 健一郎 並木 和人
奥田 暁 鳥井原 誠

Proposed Evaluation Method for Fracture Zones in Rock Mass Using Seismic Reflection Profiling

Toru Kuwahara Kenichiro Suzuki Kazuto Namiki
Satoshi Okuda Makoto Toriihara

Abstract

The appearance of seismic reflection is related to the reflection coefficient, which is a function of seismic velocity and density in the seismic exploration. The seismic reflection plane detected in the usual seismic exploration is a sedimentary stratum. However, it may be possible to detect it as a fracture zone in the hard rock mass as well as the soft sedimentary layers if there are differences of fracture frequency in the rock mass. We contribute to the hydrological modeling of the rock mass if we can clarify the relationship between the property of seismic reflection and fracture characterization. This paper proposes a method for evaluating a rock mass by seismic reflection, by carrying out a fracture survey along a borehole, geophysical logging, and geophysical exploration, thus determining the relationships among seismic reflection, physical properties of rock mass, and distribution of fracture zones.

概 要

反射法地震探査における反射面の出現は、地下の弾性波速度と密度の関数である反射係数の大小と関係し、地質の各種境界面に対応する。通常の調査で明らかにされる反射面は、第四紀層や第三紀層などの地層境界面である。しかし、硬質岩盤においても、亀裂頻度の変化による層境界が存在すれば物性変化が生じて、堆積層と同様に反射面が存在し、これを検出できる可能性がある。深部岩盤構造物の調査設計に際して、亀裂を考慮した地下構造のモデル化は、岩盤評価に際して極めて重要であるので、反射特性とフラクチャーゾーンとの関連性を把握できれば、広域および深部岩盤のモデル化技術として大きな貢献が可能となる。本論文ではボーリング孔内での亀裂調査・物理検層、2次元および3次元反射法探査などの原位置調査実験により、反射特性、亀裂分布、岩盤物性の相互関係を検証し、反射特性に基づいた岩盤フラクチャーゾーンの評価手法を提案した。

1. はじめに

岩盤中の亀裂評価（調査、検出、モデリング、予測）技術は、土木、地熱・石油開発の各分野でさまざまな手法で研究がなされている^{1),2),3)}。土木分野の深部岩盤構造物の調査設計に際して、亀裂を考慮した深部地下構造のモデル化は、岩盤の水理および変形評価に関して極めて重要とされている。土木分野では試験坑道あるいは施工現場の掘削面などを利用して、亀裂の分布を調査解析しモデル化する研究が進んでいるが、初期の調査段階ではボーリング調査に頼らざるを得ないのが現状である。

ボーリング掘削で得られるコア試料は、亀裂の直接的な証拠であるが、破碎帯部でのコア回収率、コアと亀裂との遭遇率の問題、コア採取のコスト的な問題などから、コアだけで地下の亀裂分布を十分に評価する事は難しい。これを補う意味で各種の物理検層あるいは物理探査（弾性波探査・電気探査など）などの活用が考えられるが、従来土木の調査設計に利用される弾性波のパラメータと

してはP波・S波速度による岩盤評価が主体であり、亀裂分布の評価には十分役立っているとは言えなかった。

ところで反射法地震探査における反射面の出現は、地下の密度と速度から計算される反射係数の大小と関係している。我が国では、特殊な地質条件を除けば、第四紀層や第三紀層などの堆積層の地層境界が、反射面に相当すると考えられている。一方、その下位にある花崗岩や古期の堆積岩類など、物性変化を伴う層構造を持たない基盤岩では明瞭な反射面は出現しないため、データ処理や地質解釈の対象外とされてきた。

しかし、基盤岩としての硬質岩盤中においても、亀裂頻度が深度方向に変化する層境界が存在すれば物性変化が生じて、堆積層の地層境界面と同様に反射面が存在し、観測手法の改善、データ処理技術の高度化、あるいは評価技術の開発によってはフラクチャーゾーンとして検出できる可能性がある。ここでは、フラクチャーゾーンを節理系や小規模断層群などからなる岩盤中の亀裂帯（不連続面）とし、それらの頻度が周囲に対して相対的に大

きくかつ物性変化を伴うゾーンと考える。フラクチャーゾーンの空間分布と岩盤物性との関連性を把握できれば、深部岩盤のモデル化技術として大きな貢献をすることが出来る。

本論文では、反射法地震探査などの原位置調査実験により、反射特性～亀裂分布～岩盤物性の相互関係を検証し、反射特性に基づいた岩盤フラクチャーゾーンの評価手法を提案した。

2. 反射特性による岩盤フラクチャーゾーン評価手法の基本的概念

2.1 岩盤中の反射特性

反射法地震探査（反射法弾性波探査）では、地下構造を判断する鍵となる反射面は、同じ極性を持った反射位相の連続性をもって認定される。反射位相、すなわち反射振幅の大きさ（境界面からの反射波の強さ）は、地層の弾性波速度と密度のコントラストによって決まる。これは反射係数と呼ばれ、次式で定義されている。

$$R_i = \frac{(i+1)V_{i+1} - iV_i}{(i+1)V_{i+1} + iV_i}$$

ただし、 R_i ：反射係数（弾性波が入射し、 i 層と $i+1$ 層の境界面で反射する反射振幅）、 $0 < R_i < 1$ 、 V ：地層のP波速度、 ρ ：地層の密度

あるいは、 $R_i = \frac{(Z_{i+1} - Z_i)}{(Z_{i+1} + Z_i)}$ 、 $Z = \rho V$ （ Z ：音響インピーダンス）

反射特性は、Fig. 1のように岩種・弾性波速度・反射係数の変化と、それらに対応する合成地震記録・垂直分解能の相違として示される。一般的に反射面は、堆積層の地層境界に相当すると考えられているので、地層境界の分解能は、観測される周波数帯域に依存している。

一方、基盤岩としての花崗岩および古期の堆積岩類などにおいても、Fig. 2のように亀裂頻度の大小という形態で深度方向に層境界が存在すれば、堆積層と同様に反射面が存在すると考えられる。亀裂頻度が小から大へと変化する境界面では反射係数はプラス（反射記録では黒塗り位相表示）、亀裂頻度が大から小へと変化する境界面では反射係数はマイナス（反射記録では白抜き位相表示）となる。この場合も、フラクチャーゾーンの分解能は、観測される周波数帯域に依存することになる。すなわち、観測記録が高周波数帯域にあれば、いずれの境界面も独立して1波長（反射記録では黒塗り位相と白抜き位相のセット）として容易に認識できるが、観測記録が低周波数帯域になると、2つの境界面で1波長となる場合もあり、反射係数のプラスとマイナスの部分を識別する必要が生じ、波形形状によっては境界面の検出精度低下もありえる。

2.2 調査実験の流れ

以上から反射特性を利用した岩盤フラクチャーゾーンの調査手法は、Fig. 3のように概念的に示される。すなわち、ボーリング孔を利用したVSP (Vertical Seismic

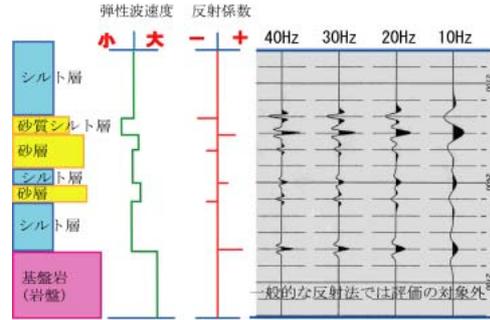


Fig. 1 堆積層と対応する反射係数列と合成地震記録
Sedimentary Layers and Synthetic Seismograms

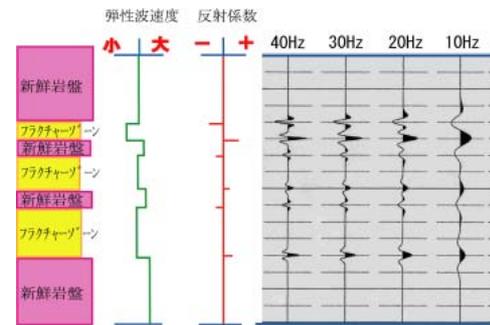


Fig. 2 岩盤と対応する反射係数列と合成地震記録
Rock Mass and Synthetic Seismograms

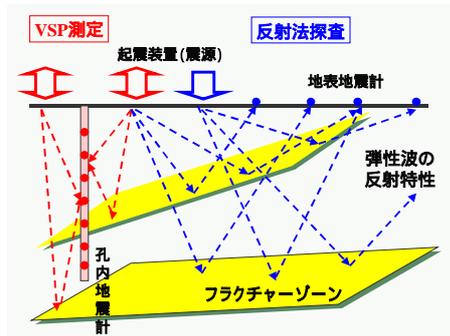


Fig. 3 反射法探査による岩盤フラクチャーゾーン調査
Detection of Fracture Zone Using Seismic Exploration

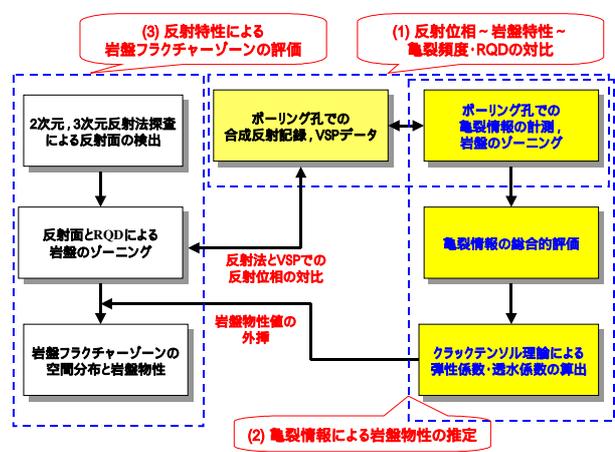


Fig. 4 調査研究の流れ
Flow Chart of the Study

Profiling)および地表からの2次元・3次元反射法地震探査から構成される。

また、今回の調査研究手法の流れをFig. 4に示す。調査研究の内容は、1)ボーリング孔の調査データを用いた弾性波の反射位相～岩盤特性～亀裂頻度・RQDの対比、2)ボーリング孔における亀裂情報による岩盤物性の推定、3)地上からの反射法地震探査に基づいた反射特性による岩盤フラクチャーゾーン評価、の3項目からなる。1)、2)と3)の間では、さらにボーリング孔での反射特性と地上からの探査による反射特性の対比、および岩盤物性値の外挿が行なわれている。物理探査に基づいた岩盤物性の推定手法には、クロスプロットによる回帰式、岩石物理学に基づいた経験式、岩石物理モデルによる理論式がある⁴⁾が、ここでは従来から研究を進めてきた岩盤力学的な不連続性岩盤の評価手法⁵⁾をさらに展開することで対応した。上記3項目について以下の各章で示す。

3. 合成地震記録・VSPとフラクチャーゾーン

3.1 地質条件と調査項目

ボーリングコア試料観察およびボアホールテレビ観察によると、実験サイトの深度110mに至る地質構成は、不均質な石灰岩、苦灰岩、泥質石灰岩からなる (Fig. 5)。RQDは概ね50以上で80以上の区間も多く、岩盤工学的には均質な岩盤中に亀裂が散在していると言える。RQDの大小による岩盤のゾーニングを図中に併せて示す。ゾーニングと岩盤物性、反射特性との関連性は後述する。

実施した計測・データ処理は、キャリパー検層・ガンマ線検層・フルウェーブ音波検層による合成地震記録の作成、VSP測定 (油圧インパクトによるゼロオフセット測定)、サスペンション型PS検層、電気検層からなる。

3.2 高周波数帯域の合成地震記録とフラクチャーゾーン

ボーリング孔内での各種調査結果に、音波検層による合成地震記録を付加した比較検討結果をFig. 6に示す。深度軸に対する合成地震記録はCycle/kmで表わされるが、ここでは便宜上対応する時間軸の周波数で表わす。合成地震記録として30～200Hzの周波数帯域から、6種類の周波数帯域の波形記録が示されているが、岩盤特性との対比用としては最も高分解能と考えられる60～200Hzの記録を利用した。反射位相は6カ所 (図中No.1～No.6)で認められるが、他の調査結果の特異点 (図中の丸印)とは、以下のような対応が認められる。

- 1)検層記録の内、弾性波速度における変動のピーク (低速度ピーク) と電気検層における変動のピーク (低比抵抗ピーク) は良く対応する。
- 2)これらのピークは、コア試料観察で得られる亀裂頻度・RQDの変動のピークと4カ所において対応し、他の2カ所では対応が認められない。
- 3)また反射位相と弾性波速度、比抵抗値、亀裂頻度・

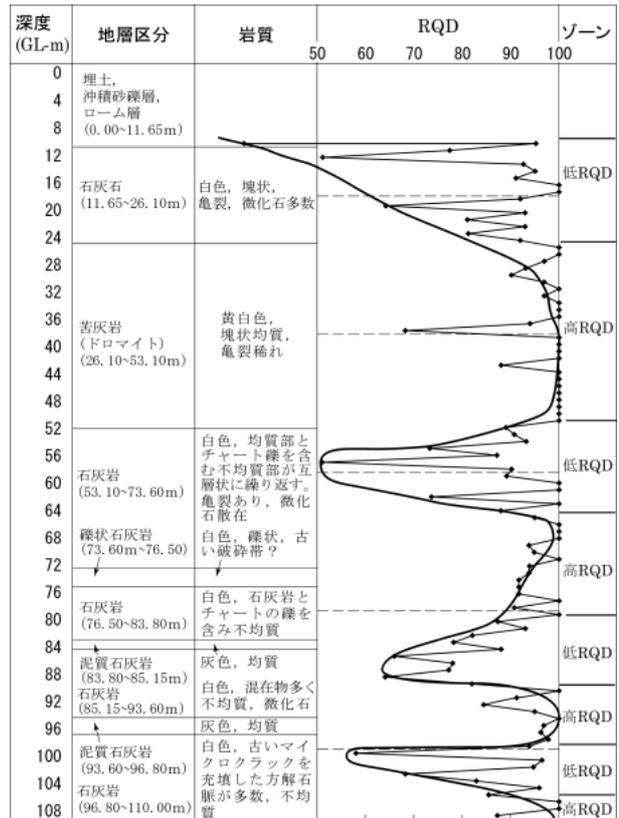


Fig. 5 調査地点の地質柱状図とRQD
Geologic Columnar Section and
Rock Quality Designation

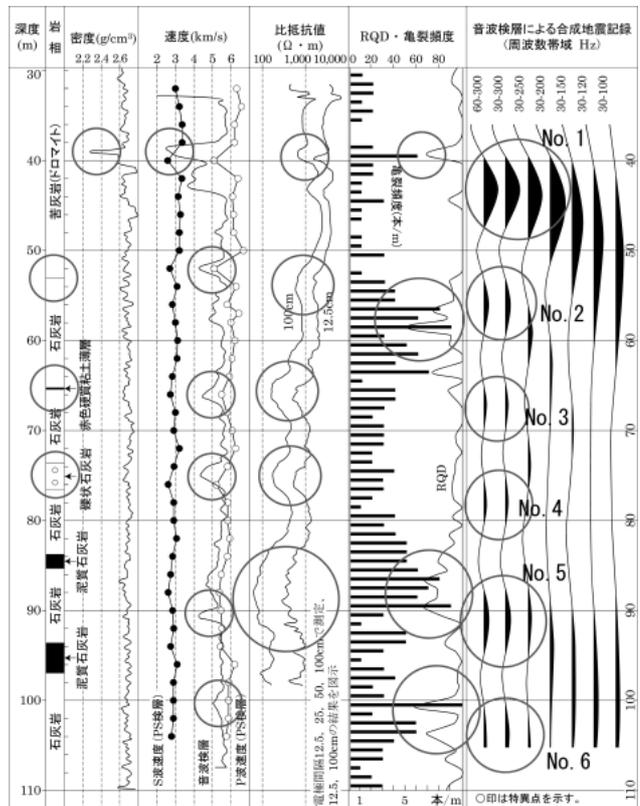


Fig. 6 物理検層結果と合成地震記録
Geophysical Logging and Synthetic Seismograms

Table 1 合成地震記録における反射位相と岩盤特性パラメータ
Reflectors in Synthetic Seismograms and Parameters of Rock Property

反射位相番号	岩種	密度 (密度検層)	速度 (音波検層)	速度 (超音波型 PS検層)	比抵抗 (電気検層)	亀裂頻度 (コア試料)	RQD (コア試料)	反射位相の原因
No.1	×							フラクチャーゾーン
No.2	(苦灰岩/石灰岩)	×						フラクチャーゾーン
No.3	(硬質粘土層)	×				×	×	岩質
No.4	(礫状石灰岩)	×				×	×	岩質
No.5	×	×		×				フラクチャーゾーン
No.6	×	×		×				フラクチャーゾーン

相関大, 相関あり, × 相関なし

RQDのピークとの対比から、4カ所の反射位相は岩盤中のフラクチャーゾーンに対応し、残りの2カ所では岩質変化に対応している (Table 1)。

3.3 合成地震記録とVSP

音波検層記録の往復走時は45～65msecと極めて短いですが、対比できる時間断面(往復走時)の範囲においては、高周波数成分をカットした合成地震記録(30～80Hz)とVSP記録が概ね対応している (Fig. 7)。岩盤中の高速度帯では、音波検層による合成地震記録は、VSPとの観測データの周波数領域の違いにより、VSPで得られる時間断面の一部しか表わしていない。すなわち、音波検層による合成地震記録は高分解能ではあるが、高周波数成分が卓越するが故に、低周波数成分まで含むVSPで得られる時間断面の一部しか表わすことが出来ない。

3.4 VSPとフラクチャーゾーン

合成地震記録中30～100Hzの記録 (Fig.6) は、VSP記録 (Fig.7) に対応している。これからVSPは、検層結果に見られる細かいピーク変動、ボアホールテレビに見られるマイクロクラック群、わずかな岩質変化とは明瞭な関係がなく、RQDのような巨視的な変化との関連性が強い。すなわち、亀裂頻度 (RQD) の顕著な変曲点、あるいは短い区間での亀裂頻度の変化が繰り返される部分で反射面が生じていると判断される。

以上から、ボーリング孔中の計測データにより、岩盤中の反射位相とフラクチャーゾーンとの対応を確認した。

4. ボーリングコア試料・検層データを利用したクラックテンソルの算出と岩盤物性評価

4.1 ボーリング孔内の亀裂調査方法と流れ

岩盤中のフラクチャー評価手法としてクラックテンソルがあるが、通常はダム基礎岩盤・トンネル切羽等の掘削面などを利用して、亀裂の長さ、方向(走向傾斜)、亀裂幅などを計測して、クラックテンソルを算出している。ここではボーリングコア観察にボアホールテレビの解析結果ならびにボアホールレーダーの孔壁反射画像を加えて、ボーリング孔内の亀裂の幾何学的特性を総合的に判断し、クラックテンソルの算出を行った。

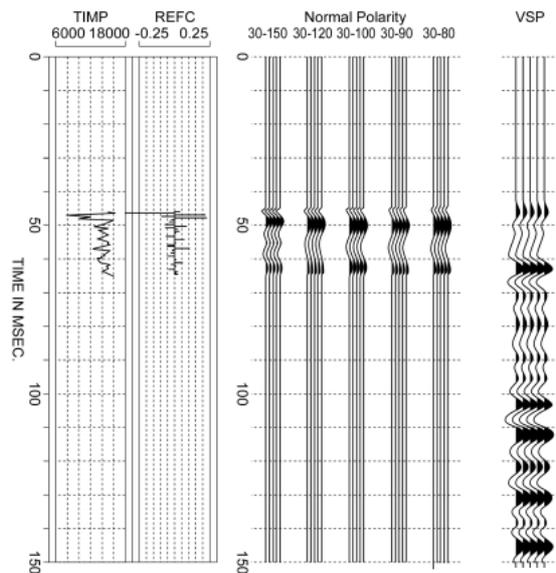


Fig. 7 合成地震記録とVSP (時間軸)
Synthetic Seismograms and VSP (Time Section)

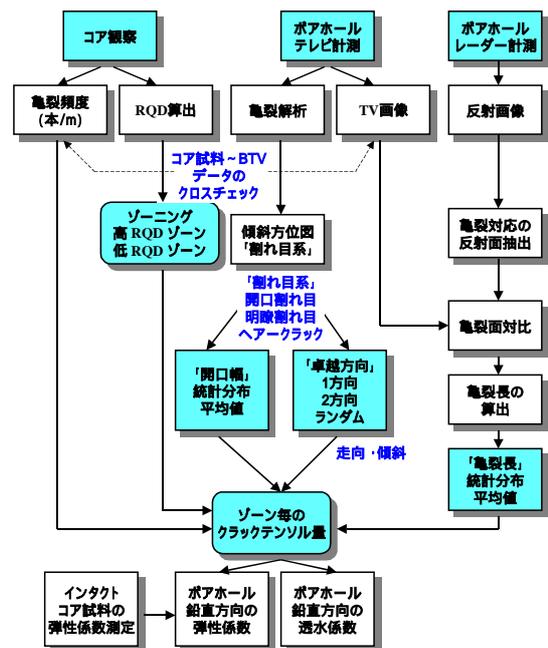


Fig. 8 ボアホールデータによるクラックテンソルの算出
Calculation of Crack Tensor using borehole data

調査項目および調査の流れはFig. 8に示す。調査内容は以下からなる。

1) コア試料観察による亀裂抽出 (亀裂頻度 本数/m, RQDの算出とゾーニング)

2) ボアホールテレビ観察 (孔壁画像による亀裂の検出, 走向傾斜・亀裂幅の計測, 統計処理による卓越方向・傾斜方位図による亀裂系の解析など)

3) ボアホールレーダー計測 (孔壁付近の反射画像の測定, 亀裂に該当する反射面の抽出, 亀裂長さの推定)

併せて, これらの調査結果のクロスチェックとして以下を行った。

1) 相互の亀裂対比 (コア試料, ボアホールテレビ, ボアホールレーダー相互の対比)

2) 開口幅の把握および統計分布の推定

3) 亀裂長さの推定ならびに統計分布の推定

4) コア試料のRQDによるゾーニング, および各ゾーン毎の亀裂の卓越性 (指向性) の有無の判断。

以上の調査とデータ分析から, ボアホール中から検出される亀裂 (主として開口亀裂と明瞭な亀裂を対象にし, ヘアクラックやマイクロクラックは除外) に対して, 実測データおよび統計分布の推定に基づいて, 亀裂の長さ・方向・幅のデータを設定した。

4.2 計測結果

ボアホールテレビによる解析結果は, 傾斜方位図の割れ目系の指向性とRQDによるゾーニングとの高い相関性を示した。ボアホールレーダーについては, 岩盤が石灰岩類であるので電磁波の透過性が極めて良好で, 孔壁から最大8m程度まで記録が得られた (Fig. 9)。亀裂と判断した反射面は, 長く, 開口性で幅の大きい亀裂と予想したが, ボアホールテレビの結果と対比すると必ずしもそうではなく, 直接的な関係は見出せなかった。なお今回使用したボアホールレーダーには方向制御用のシステムが付属していないので, 測定中のツールの回転の影響も想定して, 反射記録の解釈を行った。

4.3 クラックテンソルの算出と岩盤物性の考察

深度GL - 12m ~ - 110mの岩盤において, 216個の亀裂データが得られた。併せてFig. 5のRQDの大小によるゾーニングに基づき, 7つのゾーンに対して, それぞれクラックテンソルおよび透水係数・弾性係数を算出した (Table 2)。なお実測データを基に統計的検討も加えた上で, 長さ r は対数正規分布, 亀裂幅 t は $t = \cdot r(\quad : \text{定数})$ と仮定して計算した。ここでは算定された透水係数と弾性係数の積を便宜上パラメータ I 値で表わした。

$$I \text{ 値 [kN/s} \cdot \text{m]} = \text{透水係数 } K_z \text{ [m/s]} \times \text{弾性係数}$$

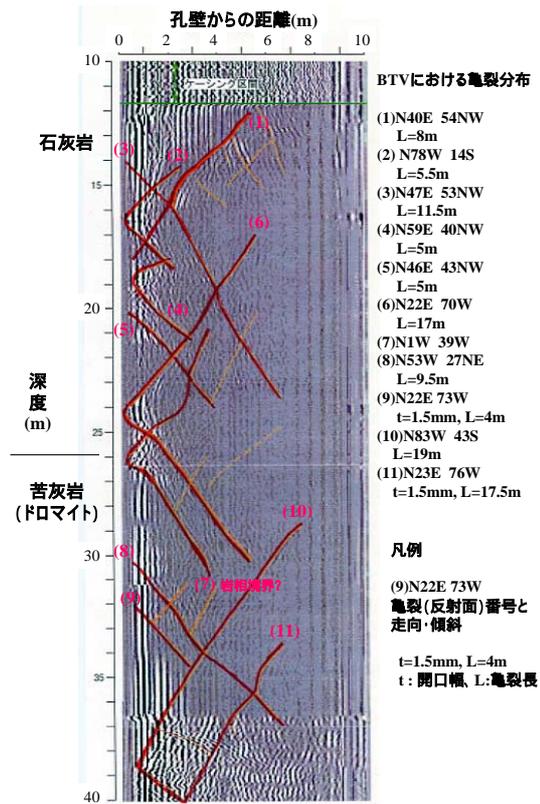


Fig. 9 ボアホールレーダーの計測結果と亀裂面 Profile of Borehole Radar and Fractures

Table 2 孔内計測データにより算出されたクラックテンソルおよび弾性係数・透水係数 Crack Tensor, Elastic Coefficient, Permeability Coefficient Based on the Borehole Data

ゾーン番号	深度 (m) (Fig. 5に 対応)	RQD (Fig. 5に 対応)	透水特性			力学特性			
			クラックテンソル		透水係数 Kz (cm/sec)	クラックテンソル		E50 (MN/m ²) (室内試験)	弾性係数 Ez (MN/m ²)
			P0	P33		F0	F33		
1	12 ~ 27	30 ~ 80	1.42E-09	3.28E-10	7.21E-03	3.667	1.235	150	51.01
2	27 ~ 53	80 ~ 100	1.44E-09	5.92E-10	5.31E-03	3.959	1.262	175	58.68
3	53 ~ 66	50 ~ 90	1.48E-10	8.27E-11	2.73E-04	2.238	1.313	330	107.71
4	66 ~ 81	90 ~ 100	1.52E-10	6.12E-11	6.58E-04	1.996	0.882	330	138.32
5	81 ~ 91	65 ~ 90	3.02E-11	1.79E-11	6.93E-05	2.012	1.201	330	114.27
6	91 ~ 100	80 ~ 100	3.41E-11	2.21E-11	5.22E-05	1.568	1.027	280	107.09
7	100 ~ 107	60 ~ 90	3.05E-11	1.84E-11	8.43E-06	0.997	0.498	330	185.02
8	107 ~ 110	90 ~							

E_z [kN/m²] × 1,000

RQD による7つのゾーン毎にI値をFig. 10に示すが、浅部に向かって透水係数が大、弾性係数が小、深部に向かって透水係数が小、弾性係数が大という傾向を示す。すなわち、浅部に向かって岩盤は強度低下・透水性大、深部に向かって強度増加・透水性小となり、著しい破碎帯を含まない調査岩盤では概ね妥当な特性と考えられる。

5. 2次元・3次元反射法探査と岩盤フラクチャーゾーン

5.1 2次元および3次元反射法探査

2次元・3次元反射法探査の測線配置、および既に述べたコア観察・各種物理検層・VSPなどを実施した計測孔との位置関係を Fig. 11 に示す。2次元反射法探査は、測線長約 200m、3次元反射法探査は、その内の約 70m の区間を用いて行った。

3次元反射法探査の測線配置は、受振ライン 2 列、発震ライン 4 列からなる。受振器（100Hz 1成分小型地震計）は、2列（14m 間隔）に合計 64ヶ所（各列の受振点間隔 2m）に設置した。その内側に発振点を 4列設置し（4m 間隔）、小型油圧インパクターにより各列 4m ピッチで、合計 113ヶ所を加震した。測定領域（反射点分布範囲）は、14m × 70m である。

探査結果は、2次元鉛直断面図として、8断面（1.83m 間隔）に分けて示した（Fig. 11）。この図では、2次元反射断面の左側は、3次元反射断面 Line 1と同じ測線位置にあるために、図中では2次元反射断面の上に3次元反

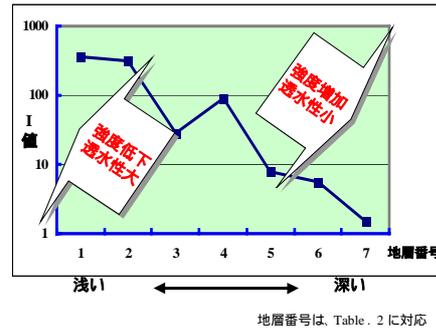


Fig. 10 クラックテンソルにより得られたボーリング孔中の岩盤物性変化
Physical Property Change along Borehole

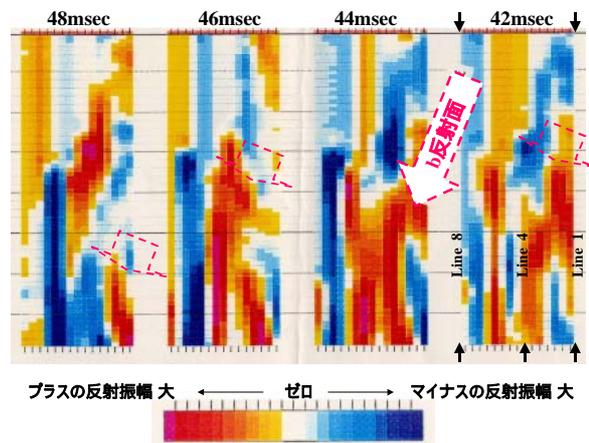


Fig. 12 タイムスライス断面にみる相対的反射強度の分布
Time Slice Sections by 3D Seismic Profiling

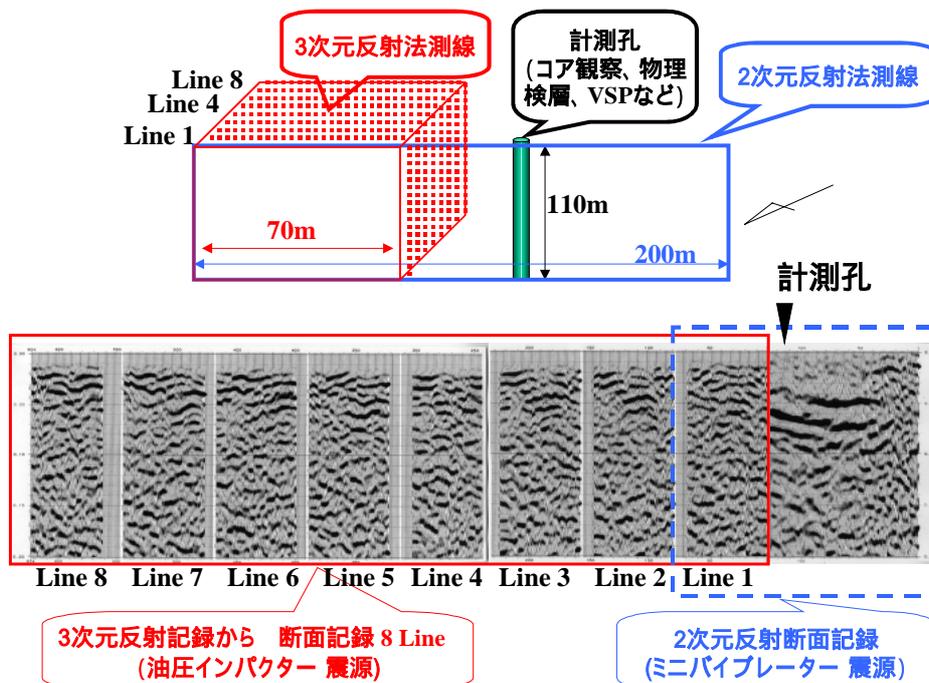


Fig. 11 2次元・3次元反射法探査の測線配置と探査結果
2D and 3D Seismic Reflection Array, and Seismic Profilings

射断面 Line 1を上書きした形で表わしている。パイプ
レータ震源と小型油圧インパクターの両者を利用したが、
相対的に周波数領域の高いインパクター震源のほうが、
高分解能の記録が得られた。各断面で表層部には強い反
射面が認められる。3次元反射断面について相互に比較す
ると、2次元測線に近いLine 1,2,3では顕著な2つの反
射面については対比可能と考えられるが、やや離れたLine
4以遠では対比がやや不明確となる。またFig. 12にb反
射面 (Fig. 14, Table 3参照) 付近のタイムスライス断
面を示す。これは時間軸による3次元データ処理結果を
基に、同じ往復走時時間における反射位相の相対的な反
射強度を、位相のプラスとマイナスに色分けして平面図
として表わしたもので、反射面の立体的な把握を行った。

5.2 2次元・3次元反射断面とRQDゾーニングとの対比、
およびフラクチャーゾーンの空間分布

以上の結果をまとめて、2次元・3次元反射断面記録と
地質柱状図の対比をFig. 13 に示す。ミニパイプ
レータによる2次元反射断面と小型インパクターによる3
次元反射断面では、震源の周波数特性の違いもあり、同
じ測線で得られた反射断面は見掛け上やや異なるが、主
要な反射面は同様に検出されている。VSPおよび低周波
数帯域が卓越する合成地震記録は、3次元反射断面と一
致している。

RQDのゾーニングによると、2次元反射断面では反
射面は、RQDが大から小へと変わる境界面に相当してい
る。3次元反射断面(Line 1)ではさらに反射面とゾー
ニングとの細かい対比が可能となる。以上を基にして、3
次元反射法記録 (Fig. 11, Line 1~8) に対し以下を行
った。

- 1) 反射係数がプラスの位相となる反射面を抽出。
- 2) 反射係数がマイナスの位相となる反射面も抽出。
- 3) 探査領域でほぼ同様な反射パターンが得られたので、
ボーリング地点でのRQDによるゾーニングと反射面との
対応が、探査領域全体まで展開可能であると判断し、
Line 2~8の反射面のゾーニングを実施。

4) RQDゾーニングされた3次元反射断面に、ボー
リング孔地点で各ゾーン毎に算出されたI値を外挿 (Fig. 14)。

以上の結果をまとめて、岩盤フラクチャーゾーンの
空間分布をFig. 15 に示す。反射法探査により得られた
3次元反射断面、ボーリング孔から得られたRQD (亀裂
頻度) のゾーニング、クラックテンソルを利用した岩盤
物性分布を組合わせた図である。これが、岩盤中の亀
裂頻度の変化ならびにそれを反映した岩盤物性 (弾性
係数と透水係数) である。図中で左側6つの図は各
ゾーンを個別に示したもので、最も右側の図がそれら
をすべてまとめた鳥瞰図である。

5.3 反射特性と岩盤特性の対応

堆積層を対象とした反射法探査では、連続性の
良い反射面が得られるが、今回はフラクチャーゾ
ンが対象であるために、得られた分布と形状は不
規則で変化が激し

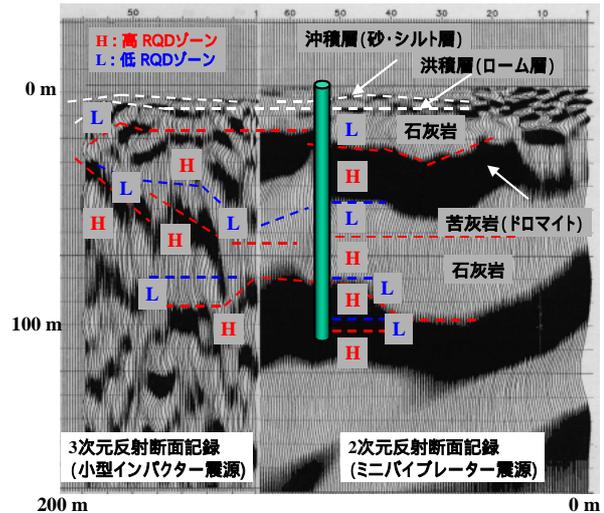


Fig. 13 2次元・3次元反射法記録と
RQDゾーニングの対比
Correlation between Seismic Profiling
and RQD Zoning

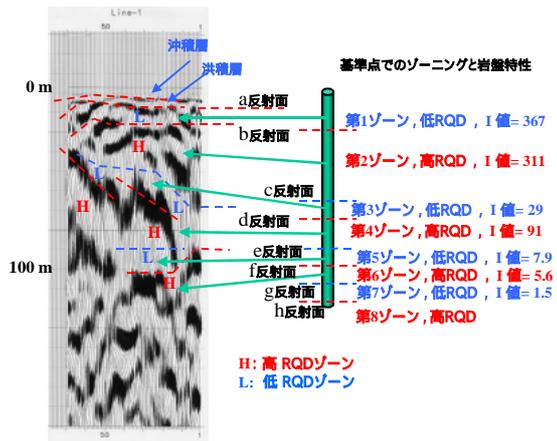


Fig. 14 3次元反射法記録と
孔内岩盤物性データの対比
Correlation between Seismic Profiling
and Physical Property

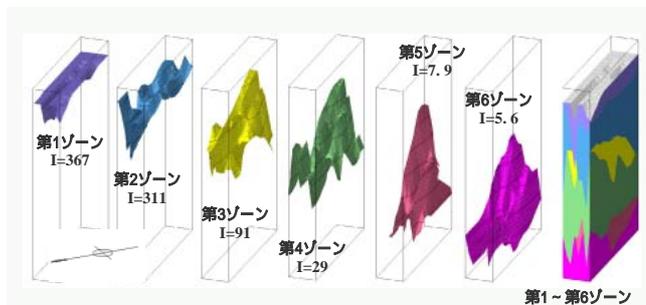


Fig. 15 岩盤フラクチャーゾーンの空間分布と岩盤物性
Spatial Distribution of Fracture Zone
and Physical Rock Properties

Table 3 反射法地震探査と岩盤特性の対応
Correlation between Seismic Profiling and Physical Rock Property

ゾーン番号	反射面 太枠: プラス位相	岩種	亀裂頻度 (RQD)	岩盤物性 (I値 弾性係数, 透水係数)	分布・形状	備考
0		沖積・洪積層				
1	a	石灰岩	低	I=367	破碎帯状の線状構造, 不規則形状	b反射面は, 強い反射面にもかかわらず, 物性変化が乏しい
2	b	ドロマイト	高	I=311	不規則形状	
3	c	石灰岩	低	I=29	不規則形状	d反射面では, 明確な反射面に対応して, 物性変化が大
4	d	石灰岩	高	I=91	破碎帯状の窪地形状	
5	e	石灰岩	低	I=7.9	大きな深度変化	f反射面では, 物性変化が乏しい
6	f	石灰岩	高	I=5.6	連続性に乏しい	
7	g	石灰岩	低	I=1.5		
8	h	石灰岩	高			

く, 連続性に乏しいものとなった。Fig. 15から, 反射法地震探査から推定される岩盤特性を, Table 3のように整理することができる。

岩盤のゾーン区分～反射特性～岩盤物性の相互関係は概ね妥当と考えるが, 不明確な部分もある。原因としては,

- 1) 反射面の振幅の大きさが, 反射法データ処理における見掛けの大きさであり, 現状では他の岩盤物性との直接的な関連性が不明なために, イメージを捉え難いこと,
 - 2) 基本となるRQDの変化が, 良好な岩盤中での相対的に小さな変化であるため, 必ずしも大きな物性変化に対応していない可能性があること,
 - 3) クラックテンソルによる透水係数は亀裂の開口幅に大きく関係するが, RQDでは亀裂の開口幅は考慮されていないこと,
 - 4) クラックテンソルによる弾性係数の算定に際して, 基礎データとなる室内試験用のインタクトなコア試料の採取が, RQDによるゾーニングを十分に代表していない可能性があること,
- などが考えられる。

6. おわりに

反射法地震探査における反射係数の定義という観点からは, 堆積層の地層境界で反射面が発生するという一般的な概念は, 硬質岩盤中では亀裂頻度が変化する境界でも反射面は同様に発生するという概念に, 展開することが出来ると考えられる。

今回の一連のフィールド実験として行った地質調査, ボーリング調査, 各種物理検層, VSP測定, 2次元・3次元反射法地震探査の結果を総合して, 反射特性に基づいた岩盤フラクチャーゾーン・岩盤物性の3次元イメージングを行った結果は, この推論の正しさを示唆するものと言える。また岩盤のゾーニングに基づいて, 反射面・岩種・亀裂頻度 (RQD) ・岩盤物性値・亀裂の分布形状

などについて整理し, 岩盤評価における相互の関係ならびに問題点を検討した。

今回は, 岩盤工学的には均質・良好な岩盤中でのフラクチャーゾーン評価という, 比較的単純な条件下での調査実験であったが, 現実には風化帯・変質帯, 岩種・岩質の変化などにより複雑な条件になるので, 反射面の解釈・判断も複雑なものになると予想される。

岩盤中の亀裂評価のためには, 高周波数・高エネルギーの震源の開発と高周波数帯域の小型地震計の製作が将来的には不可欠である。現状では各種周波数帯域の記録を取得して総合的に解析・評価していくことが重要と考えている。

また岩盤物性評価に関しては, 今回用いた不連続性岩盤の力学モデルに加えて, 物理探査データによるクロスプロットあるいは岩石物理モデルなども検討し, 複合的に評価することが信頼性の向上に寄与すると考えられる。

参考文献

- 1) 高山邦明: 最近のフラクチャー評価技術, 石油/天然ガス レビュー, Vol.34, No.5, pp.92~108, (2001)
- 2) 地盤工学会 岩の力学委員会: 不連続性岩盤と構造物に関する研究報告書, 地盤工学会, 480 p., (1995)
- 3) 地盤工学会 亀裂性岩盤における浸透問題に関する研究委員会: 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, 308 p., (2001)
- 4) 吉村公孝, 林 俊夫, 小西千里, 東 宏幸, 高橋 亨: 物理探査解釈技術を用いた高レベル放射性廃棄物地層処分における地質環境特性の把握, 物理探査学会第108回(平成15年度春季) 学術講演会講演論文集, pp.211~214, (2003)
- 5) 平間邦興, 丸山 誠, 桑原 徹, 鈴木健一郎: 不連続岩盤の亀裂評価と透水性, 大林組技術研究所報, No.40, pp.1~11, (1990)